УДК 620.193.23:620.179.16

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ОБНАРУЖЕНИЯ УТЕЧЕК В МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ НА ОСНОВЕ ИХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Т.Е. Степанченко, В.Н. Шкляр

Томский политехнический университет
E-mail: iccs@iccs.cctpu.edu.ru

Рассмотрены алгоритмы определения параметров утечки в трубопроводах, полученные по уравнениям гидродинамических процессов в них, возникающих при утечках, приведены результаты исследования предложенных алгоритмов определения параметров утечки.

Для транспорта нефти и газа актуальной является проблема обеспечения надёжности магистральных трубопроводов. При возникновении утечки по любой причине необходимо в кратчайшие сроки обнаружить сам факт существования утечки и определить место её возникновения. Сокращение времени от момента возникновения утечки до момента обнаружения с установлением её координаты позволяет максимально быстро принять меры по локализации аварии, сокращая её масштабы и затраты на ликвидацию. Для удовлетворения перечисленным требованиям трубопроводный транспорт дол-

жен быть оснащён автоматически работающими системами обнаружения утечек.

В представленной работе рассматривается метод определения утечки по изменению профиля давления вдоль трубопровода, который базируется на фиксации понижения давления в случае возникновения утечки на контролируемом участке [1, 2]. Предполагается, что рассматриваемый трубопровод сплошной, без дополнительных отводов, по которому протекает однородная жидкость.

При разработке алгоритмов использовалась гидродинамическая модель, описывающая процессы утечки в трубопроводе в виде дифференциального уравнения и граничных условий [3]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} - \frac{c^2}{F} G_T \delta(x-\xi),$$

$$\text{при} \quad t=0, \; P(0,x) = P_H - \frac{P_H - P_K}{l} x;$$

$$\text{при} \quad x=0, \; P=P_H; \quad \text{при} \quad x=l, \; P=P_K,$$

где $\chi=c^2/b$; $b=(\lambda w/2d)_m=2a$; $\delta(x-\xi)$ – функция Дирака; P – давление в магистрали; t – время; x – координата по длине трубы; l, d – длина и внутренний диаметр трубопровода; F – площадь сечения трубы; C – скорость распространения волны давления; G_T – массовый расход утечки; λ – коэффициент сопротивления трубопровода; w – скорость движения нефтепродукта; ξ – координата места утечки.

Для приведённых уравнений может быть получено, методом разделения переменных (методом Фурье), точное решение [3]:

$$P(x,t) = P_H - \frac{(P_H - P_K)x}{l} - \frac{2aG_T}{lF}(l-\xi)x +$$
$$+\sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin\frac{n\pi x}{l} \exp\left[-\left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \frac{C^2}{2a} t\right], \text{ при } \; 0<x<\xi;$$
$$P(x,t) = P_H - \frac{(P_H - P_K)x}{l} - \frac{2aG_T}{lF}(l-x)\xi +$$
$$+\sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin\frac{n\pi x}{l} \exp\left[-\left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \frac{C^2}{2a} t\right], \text{ при } \; \xi<x<l; \quad (1)$$
$$C_n = \frac{4aG_T l}{\pi^2 n^2 F} \sin\frac{n\pi\xi}{l},$$

где P_H, P_K – давления, соответственно, в начале и на конце участка трубопровода. Эти значения давлений в процессе функционирования трубопровода должны поддерживаться постоянными.

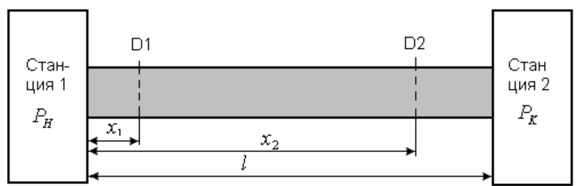


Рис. 1. *Схема трубопровода при наличии четырёх датчиков*

Будем рассматривать прямолинейный трубопровод, пролегающий между двумя насосными станциями. На каждой станции имеется датчик давления, а на всем протяжении трубы располагаются два датчика давления D_1 и D_2 (рис. 1).

Тогда расчётные формулы для определения параметров утечки по профилю давления, определяемому по четырём датчикам, будут иметь вид [4]:

$$\xi = \frac{b_3(P_{D2} - b_2)\, l}{b_4(P_{D1} - b_1) - b_3(P_{D2} - b_2)};$$
$$G_T = \frac{b_3(P_{D2} - b_2) - b_4(P_{D1} - b_1)}{l b_3 b_4}, \quad (2)$$

где

$$b_1 = P_H + \frac{P_K - P_H}{l} x_1; \quad b_2 = P_H + \frac{P_K - P_H}{l} x_2;$$
$$b_3 = \frac{2ax_1}{F}; \quad b_4 = \frac{2a(l-x_2)}{F}; \quad b_5 = \frac{2}{\pi}(P_H - P_K);$$
$$b_6 = \frac{8al}{\pi^3 F}; \quad b_7 = \sin\frac{\pi x_1}{l}; \quad b_8 = \sin\frac{\pi x_2}{l}.$$

P_{D1} и P_{D2} – давление на первом и втором датчиках.

Как видно из формул (1), решение содержит стационарную и нестационарную составляющие. Алгоритм (2) основан на стационарном решении гидродинамической модели, определяющей профиль давления по четырём датчикам. Проверка адекватности модели и работоспособности полученного алгоритма была проведена на имитационных моделях, разработанных в программном пакете MatLab, с использованием приложения MatLab – Simulink. Расчёты проводились для реального объекта по обобщённой схеме, рис. 2.

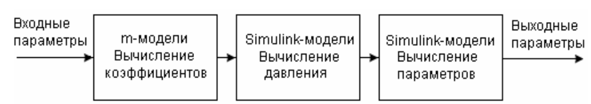


Рис. 2. *Обобщённая схема вычисления параметров утечки*

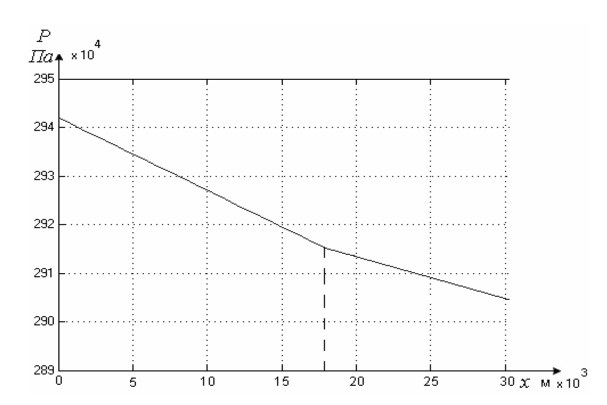


Рис. 3. *График профиля давления*

В результате моделирования получен график профиля давления, представленный на (рис. 3). Из графика видно, что в месте прорыва трубопровода ($\xi=18\cdot10^3$ м) происходит надлом кривой, параметры которого могут быть вычислены по формулам (1). Это доказывает эффективность алгоритма определения параметров утечки по профилю давления.

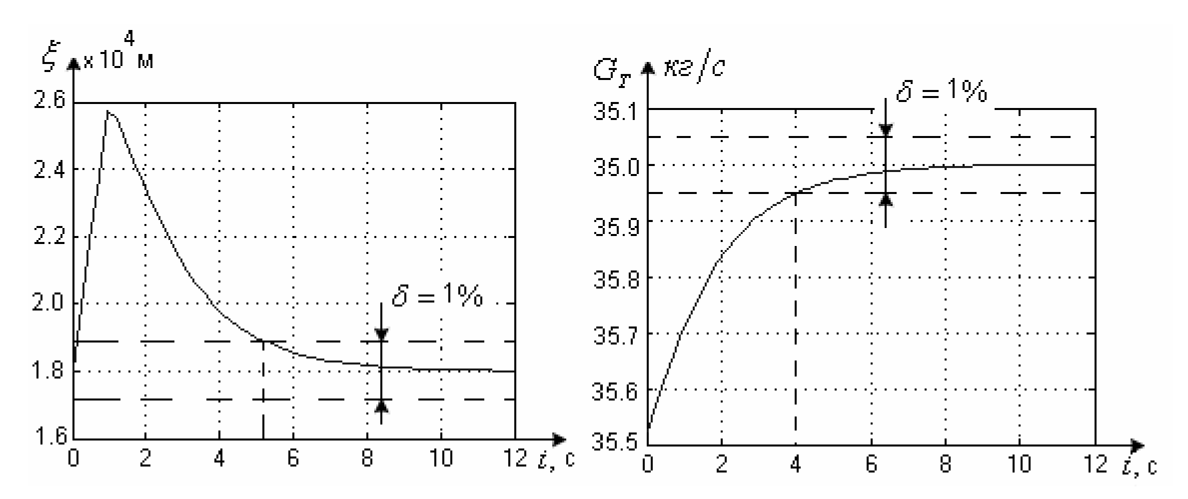


Рис. 4. Графики процесса вычисления координаты утечки и массового расхода при использовании алгоритма по профилю давления с четырьмя датчиками

Однако при использовании данного алгоритма определение параметров начинается после завершения переходных процессов в трубопроводе, что увеличивает время определения.

Для повышения быстродействия определения параметров утечки с определённой точностью можно использовать рассмотренный выше алгоритм обнаружения по профилю давления, определяемого четырьмя датчиками давления, не дожидаясь завершения переходных процессов в трубопроводе при возникновении утечки.

При этом расчёт выполняется по тем же формулам, но в модели профиля давления в трубопроводе учитывается нестационарное решение.

Графики процесса вычисления координаты утечки и массового расхода при использовании алгоритма по профилю давления с четырьмя датчиками с учётом переходных процессов в трубопроводе представлены на рис. 4.

По приведённым графикам видно, что при использовании рассмотренного выше метода на основе показаний четырёх датчиков давления для определения координаты утечки и расхода с однопроцентной погрешностью происходит за время 5,1 и 4,0 с соответственно, что на порядок меньше времени окончания переходных процессов в трубопроводе.

Для ещё большей оперативности определения параметров утечки был разработан алгоритм [5], который предполагает применение шести датчиков, определённым образом расположенных по трубопроводу (рис. 5). Тогда выражения для расчёта расхода и координаты утечки имеют вид:

$$G_T = \frac{8[RP_{+1,4} - P_{+2,3} - (R-1)P_{+H,K}]}{A(2-R)};$$

$$\xi = \frac{2F}{0,2071\cdot 2aG_T}\times$$

$$\times(0,39645P_{-H,K} - P_{-1,4} + 0,7071P_{-2,3}) + \frac{l}{2}, \qquad (4)$$

где

$$R = \frac{\sin(\pi/4)}{\sin(\pi/8)} = 1,847775638; \quad P_{+H,K} = P_H + P_K;$$

$$P_{-1,4} = P(x_1,t) - P(x_4,t); \quad P_{+1,4} = P(x_1,t) + P(x_4,t);$$

$$P_{-2,3} = P(x_2,t) - P(x_3,t); \quad P_{+2,3} = P(x_2,t) + P(x_3,t);$$

$$A = \frac{2al}{F}.$$

Моделирование проводилось для того же объекта. Графики зависимости координаты утечки и массового расхода при использовании алгоритма по профилю давления с шестью датчиками представлены на рис. 6. При этом прорыв трубопровода происходит между третьим и четвёртым датчиками, то есть ξ=18·10³ м.

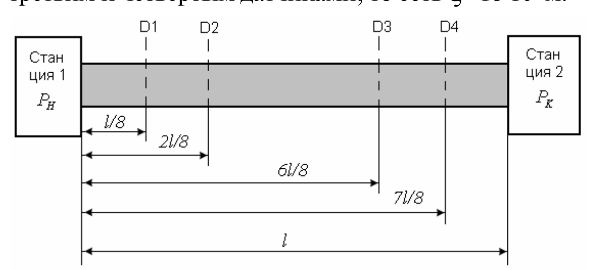


Рис. 5. Схема расположения датчиков на трубопроводе при шести точечном контроле

Из приведённых графиков видно, что при использовании метода на основе показаний шести датчиков решения для определения координаты утечки и расхода становятся точными за время 1 с.

Были проведены исследования алгоритмов с учётом зоны нечувствительности датчиков (β), а именно для β=5 кПа. Результаты исследований для расчёта массового расхода и координаты утечки для алгоритма по четырём и шести датчикам приведены на рис. 7. Данное исследование показало, что наличие зоны нечувствительности влияет на точность определения параметров утечки, причём, большей точностью обладают вычисления при использовании алгоритма с шестью датчиками.

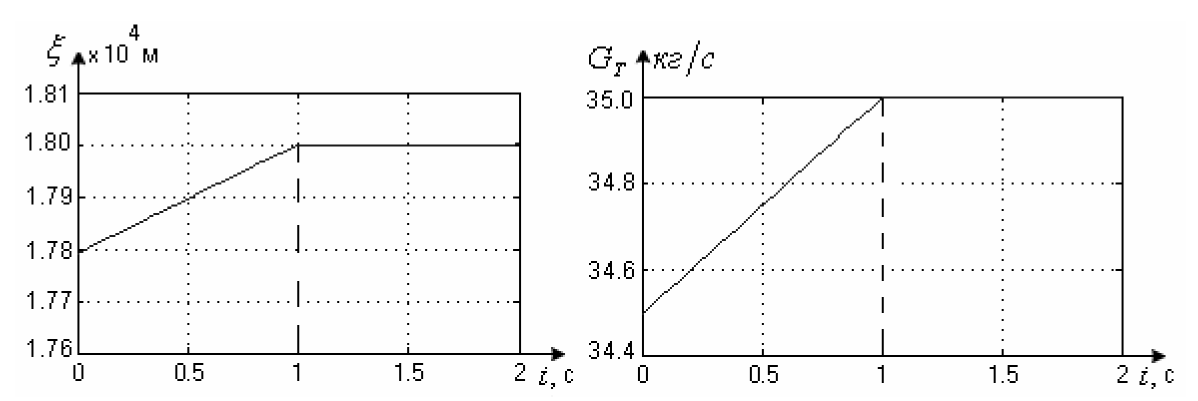


Рис. 6. *Графики процесса вычисления координаты утечки (слева) и массового расхода (справа) при использовании алгоритма по профилю давления с шестью датчиками*

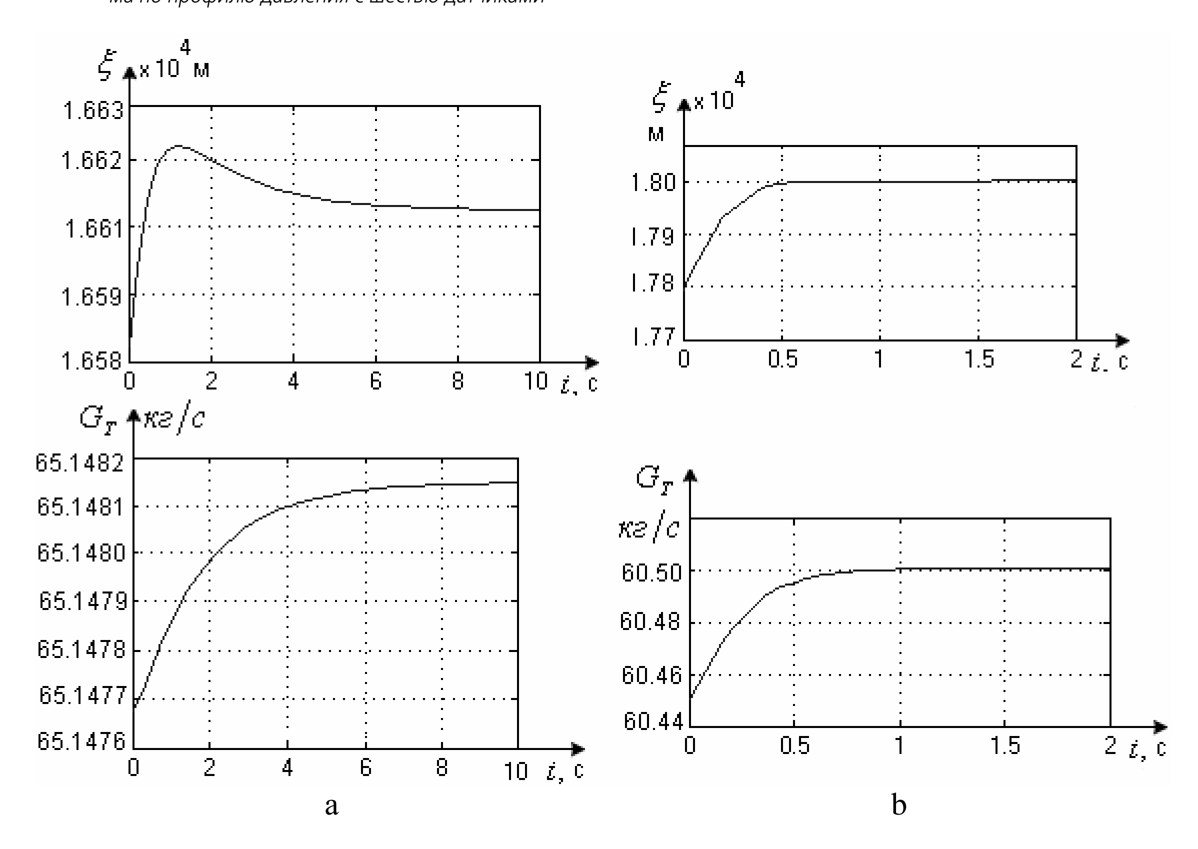


Рис. 7. *Графики процесса вычисления координаты утечки и массового расхода при использовании алгоритма по профилю давления с β=5 кПа: а) при четырех датчиках, b) при шести датчиках*

При исследовании представленных выше алгоритмов определения параметров утечки было исследовано влияние некоторых параметрических возмущений, в частности, влияние неточности определения скорости звука в жидкости.

Исследования показали, что при задании в алгоритмах вычисления скорости звука с погрешностью в 10 % параметры утечки будут вычислены с погрешностью в 3 %. Для практического использования рассмотренных в работе алгоритмов требуется более полное исследование влияния на них всего спектра параметрических возмущений.

Выводы

1. Получены алгоритмы определения параметров утечек по точным решениям уравнений гидродинамических процессов в трубопроводах при утечке. Показана в результате имитационного моделирования работоспособность этих алгоритмов.
2. Выбран метод исследования алгоритмов, проведено моделирование процессов определения параметров утечки по трём алгоритмам: по профилю давления без учёта и с учётом переходных процессов в трубопроводе, определяемого че-

тырьмя датчиками давления и шестью датчиками давления, определённым образом установленными по длине трубопровода.

3. Сравнение исследуемых алгоритмов показало, что при одинаковой точности определения параметров утечек наибольшей оперативностью (быстродействием) обладает алгоритм определения параметров утечки по профилю давления с шестью датчиками, установленными определённым образом по длине трубопровода.
4. В результате исследования влияния нечувствительности датчиков давления на результаты определения параметров утечки, было выявлено влияние величины зоны нечувствительности на точность определения. Установлено, что алгоритм с шестью датчиками позволяет вычислить координаты утечки и её массовый расход с большей точностью, чем алгоритм с четырьмя датчиками при одинаковом значении зоны нечувствительности датчиков.

Для практического использования представленных алгоритмов, в дальнейшем планируется сделать доработку алгоритмов определения параметров утечки для участков трубопровода с уклонами и отводами, провести моделирование с учётом влияния большего числа параметрических возмущений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барбашов Е.Д., Коняхин А.Н. Результаты испытаний параметрической системы обнаружения утечек // Комплексные решения в автоматизации для динамического развития нефтегазовой отрасли: Матер. II научно-практич. конф. – 1–2 ноября 2001 г. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2002. –С. 62–67.
2. Гольянов А.А. Анализ методов обнаружения утечек на трубопроводах // Транспорт и хранение нефтепродуктов. – 2002. – № 10–11. – С. 5–14.
3. Степанченко Т.Е., Шкляр В.Н Исследование математической модели процесса утечки жидкости в трубопроводе // Современные техника и технологии: Труды VII Междунар. научно-практ. конф. молодых ученых. – Томск, 2005. – Т. 1. – С. 250–254.
4. Степанченко Т.Е., Шкляр В.Н. Исследование алгоритмов обнаружения утечек в трубопроводах, построенных на основе моделей гидродинамических процессов // Современные техника и технологии: Труды VIII Междунар. научно-практ. конф. молодых ученых. – Томск, 2006. – Т. 1. – С. 248–251.
5. Шкляр В.Н. Пространственно-комбинационный метод определения параметров утечки в магистральном нефтепроводе // Автоматическое управление и информационные технологии: Межвуз. научно-технический сб. – Вып. 1. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – С. 18–25.

УДК 658.012.011.56:681.324